第39卷 第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

巴托拉等冰川的新近变化及对中巴公路的影响

李志杰[1,2]， 王宁练[1,2,3]， 常佳雯[1,2]

（1. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室，陕西 西安 710127；2. 西北大学城市与环境学院 地表系统与灾害研究院，陕西 西安 710127；3. 中国科学院青藏高原研究所，北京 100101）

摘 要：喀喇昆仑公路是推动我国新疆地区对外开放的重要通道，长期受到冰川灾害的影响，尤以罕萨河中游的巴托拉段最为严重。本研究基于野外考察、遥感影像等资料，分析了巴托拉、帕苏、固尔金冰川近百年的变化、变化原因及对公路的影响。结果表明：(1) 近百年来，特别是2000年以来，巴托拉、帕苏、固尔金冰川总体处于微弱退缩状态，对公路的直接威胁趋于减弱。(2) 巴托拉、帕苏、固尔金冰川消融加剧与冰舌波动导致融水径流频繁迁移，冰川融水洪水、冰湖溃决洪水、冰川泥石流等次生灾害对公路安全运行的影响正日渐凸显。(3) 巴托拉段冰川变化对公路最直接的威胁在于2021年6—7月巴托拉河新的改道，改道后水流将直接冲击侵蚀路基，影响公路安全。本研究成果可为中巴公路沿线以及我国西部与中亚、南亚其他陆路通道的冰川灾害监测防治提供参考借鉴。

关键词：喀拉昆仑公路；巴托拉冰川；融水径流；冰川灾害

喀喇昆仑公路(Karakoram Highway，KKH，以下简称公路)北起新疆喀什，南至巴基斯坦塔科特，是中巴两国实现互联互通，建设中巴经济走廊的战略通道。公路穿越的东帕米尔高原、喀喇昆仑山是高亚洲冰川分布最集中的地区之一，冰川灾害曾多次威胁和中断公路通行，造成重大损失[1-3]。位于巴基斯坦北部罕萨河(洪扎河)中游的巴托拉段是整个公路沿线距离冰川最近、冰川灾害最集中的路段，其中以巴托拉(Batura)、帕苏(Pasu)、固尔金(Ghulkin)等3条冰川对公路的威胁最大也最为直接[4-6]。

1973年，巴托拉冰川主排水道(巴托拉河)改道引发的冰川洪水冲毁了建设中的公路和公路桥。1974—1975年，为提供合理的修复设计，中国考察组对巴托拉冰川开展了包括末端进退、流速、厚度、融水径流等全方面、详尽的科学考察[4]。最终考察组提出按照原线修复的科学建议，确保了公路的长期稳定通行[7]。此后的1978年、1980年、1994年等，考察组再次对巴托拉地区开展科学考察，积累了丰富的地质地貌、冰川物理、水文、气象等科学资料[7-8]。在此基础上，学者们揭示了巴托拉、帕苏、固尔金等冰川在20世纪近百年的进退变化，并预测巴托拉冰川将于2010s前后再次发生前进[4-5,7-8]。

进入21世纪以来，随着气候波动的加剧，巴托拉、帕苏、固尔金等冰川发生了许多新的变化，这些变化对公路的正常通行产生了新的威胁[9]。例如巴托拉冰川的主排水洞位置不断北移，最终导致融水通道被冰舌挤压切断，时隔近50 a后再次引发巴托拉河的大改道；帕苏冰川末端的冰碛阻塞湖频繁溃决，2008年1月和4月2次引发冰湖溃决洪水，中断公路通行[10]；固尔金冰川末端的频繁波动导致冰崖下的排水通道不断迁移，仅在2008年就引发4次泥石流，致使公路桥底严重淤积[6,10-11]。因此，鉴于灾害风险的日渐凸显和公路无可取代的地位，有必要对巴托拉、帕苏、固尔金冰川的历史与新近变化进行揭示和分析，为公路的安全运行和灾害防治提供参考。

1 研究区概况

巴托拉、帕苏、固尔金冰川发源于喀喇昆仑山

收稿日期：2022-05-01； **修订日期：**2022-07-12
基金项目：中国科学院战略性先导科技专项(XDA20060201；XDA19070302)；国家自然科学基金重点项目(42130516)；第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK020102)
作者简介：李志杰(1995-)，男，博士研究生，主要从事冰川变化与气候变化研究. E-mail: lizhijie820@163.com
通讯作者：王宁练. E-mail: nlwang@nwu.edu.cn

西段主脊——洪扎喀喇昆仑山北坡(图1)。洪扎喀喇昆仑山平均海拔超过6000 m,最高峰巴托拉峰海拔高达7795 m,为冰川发育提供了极为有利的地形条件,使得巴托拉冰川群成为了公路沿线规模最大、末端海拔最低、进退最为频繁的冰川群之一。巴托拉、帕苏、固尔金冰川上游粒雪盆面积开阔,补给物质充足,中下游则深入了干热河谷,消融强烈,因此属于典型的多温型冰川,并表现出较高的物质平衡水平[4]。本研究的解译结果表明,2021年巴托拉冰川长约56.5 km,面积307.12±4.32 km^2,末端海拔约2620 m;帕苏冰川长约26.4 km,面积64.81±0.72 km^2,末端海拔约2700 m;固尔金冰川长约17.8 km,面积28.26±0.47 km^2,末端海拔约2540 m。

2　数据与方法

2.1　数据源

2.1.1　Landsat影像　本研究使用了获取于1972—2022年的25景Landsat系列影像,以揭示研究冰川的相关变化(表1)。所用影像均为L1T级产品,由USGS(United States Geological Survey,https://earthexplorer.usgs.gov/)进行了系统辐射校正和几何校正,并结合DEM进行了地形校正。由于Landsat系列影像有相当高的正射校正精度,达到1/2像元左右,因此本研究直接利用Landsat影像开展冰川变化研究[12]。为提高冰川边界、出水洞、融水径流等地物的解译或识别精度,本研究选取了消融季末期,冰川区无云、山体阴影覆盖较小的影像[13]。

2.1.2　冰面高程变化数据集　Brun等[14]利用ASTER立体像对提取DEM,基于大地测量学方法,通过DEM的空间匹配与误差校正,重建了2000—2016年高亚洲冰川的表面高程变化与物质平衡,并生成了高亚洲冰面高程变化数据集。数据集中的误差主要源于DEM的生成精度及其空间匹配偏差,因此以非冰川区等地形稳定区的高程残差来校正并评价冰面高程变化的误差[14]。该数据集的空间分辨率为30 m,可获取于PANGAEA (https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.876545)。

2.1.3　冰面流速数据集　NASA的ITS_LIVE(Intermission time series of land ice velocity and elevation)产品包含了1985—2020年高亚洲主要冰川的流速数据。该产品基于Landsat影像,采用Gardner等提出的自动裂缝特征跟踪处理链方法,通过进行局部归一化、过采样、特征跟踪等提取冰川流速[15-16]。影像的空间匹配偏差是该产品的主要误差来源,尽管在生成过程中已基于基岩等稳定地形对其进行校正,但无法彻底消除。因此,ITS_LIVE产品同样基于非冰川区的流速残差评价冰川流速的不确定性[15]。1999年之前(TM影像)冰川流速估算的不确定性超

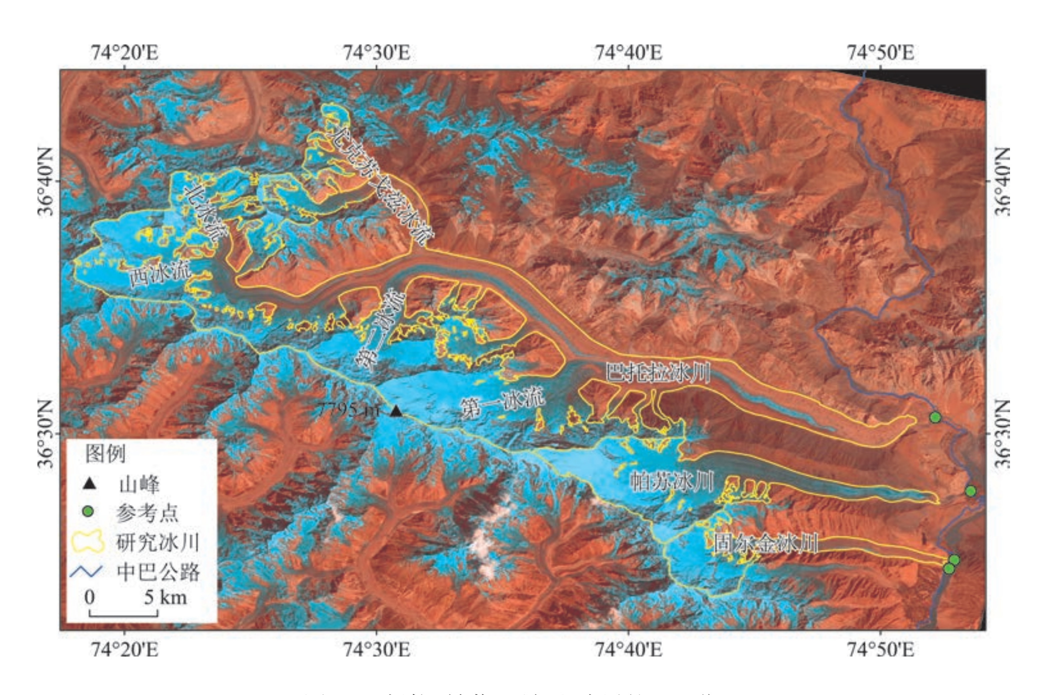


图1　巴托拉、帕苏、固尔金冰川的地理位置

Fig. 1　Geographic location of the Batura, Pasu, and Ghulkin Glacier

表1 遥感影像数据

Tab. 1 List of the Landsat images used in this study

影像编号	获取日期/年-月-日	分辨率/m	影像编号	获取日期/年-月-日	分辨率/m
LM21610351972251AAA05	1972-09-07	60	LC81490352013282LGN00	2013-10-09	15
LM21610351979250AAA05	1979-09-07	60	LC81500352014276LGN00	2014-10-03	15
LT51490351990219ISP00	1990-08-07	30	LC81500352015231LGN00	2015-08-19	15
LT51490351993163ISP00	1993-06-12	30	LC81490352016275KHC00	2016-10-01	15
LT51490351994246ISP00	1994-09-03	30	LC81490352017261LGN00	2017-09-18	15
LT51490351997222SGI00	1997-08-10	30	LC81490352018216LGN00	2018-08-04	15
LT51490351998225XXX01	1998-08-13	30	LC81490352019267LGN00	2019-09-24	15
LE71490352000255SGS00	2000-09-11	15	LC81490352020238LGN00	2020-08-25	15
LE71490352001241SGS00	2001-08-29	15	LC71490352021160LGN00	2021-06-09	15
LE71490352002276SGS00	2002-10-03	15	LC71490352021192LGN00	2021-07-11	15
LT51490352008285KHC01	2008-10-11	30	LC81490352021272LGN00	2021-09-29	15
LT51490352009223KHC00	2009-08-11	30	LC81490352022147LGN00	2022-05-27	15
LT51490352010290KHC00	2010-10-17	30			

过10 m·a^{-1}，1999年之后（ETM+影像）降低为约2 m·a^{-1}，2013年之后（OLI影像）降低为约0.5 m·a^{-1}[16-17]。本研究选用了其中1985—2018年的冰川年平均流速合成数据，空间分辨率为120 m（https://its-live.jpl.nasa.gov/）。

2.2 方法

2.2.1 冰川边界解译 由于研究冰川表面存在大范围表碛覆盖，且进退变化频繁，本研究采用目视解译提取冰川边界[13]。在中上游裸冰区，直接根据Landsat假彩色影像（热红外、红、绿波段组合）中显著的色彩差异进行冰川边界的数字化（图1）[18]。在表碛覆盖的冰川下游，则根据末端冰崖与出水洞的组合、高程变化等地形和水文特征识别冰川边界[19]。假彩色影像中，裸冰区与表碛区、表碛区与基岩区、冰崖与水流等的色彩差异均得到了显著增强，由此可准确识别冰舌、出水洞等的位置。野外考察资料表明，研究冰川冰舌消融强烈，因此末端冰崖与出水口的组合即代表了冰川运动的最前缘[4,6,20]。在实际解译中，本研究首先完成2021年的冰川边界提取。在此基础上结合不同时期的影像，修改冰舌等发生变化的部位，以获取其他年份的冰川边界。

2.2.2 解译精度评价 基于光学影像解译冰川边界的精度主要受影像空间分辨率的影响，因此本研究采用统计冰川轮廓线经过的像元数量的方法，评价目视解译提取冰川边界的不确定性[21]。公式如下：

$$E = N \cdot \lambda / 2$$

式中：E为冰川面积的不确定性；N为冰川边界经过的像元数量；λ为像元面积。

2.2.3 出水洞与融水通道识别 出水洞指位于冰川末端，冰内和冰下水系的排水出口，本研究结合野外考察记录和遥感影像识别冰川出水洞与融水通道的迁移变化。如图2所示，在消融季末期的Landsat和Google Earth影像中，得益于巴托拉冰川较大的排水量，冰川出水洞与融水通道的准确位置可获得有效识别。此外，在1973—2021年2次大改道期间，巴托拉河下游保持稳定，上游随冰舌波动而延伸，因此结合不同时期的遥感影像即可准确识别出水洞与融水通道的变迁过程。

3 结果与分析

3.1 冰川进退变化

近150 a来，巴托拉冰川发生过多次进退波动。1873年巴托拉冰川发生前进，但此后近50 a间冰舌位置基本保持稳定。1930s冰川开始衰退，1944—1966年退缩827 m。1960s末转入前进，1966—1980年前进约136 m。1980s初再次衰退，至1994年累计后退了150—200 m[4-5,7,22-23]。影像资料表明（图3a），1994—2008年巴托拉冰舌继续后退约410 m，2008年冰舌再次前进，至2021年7月累计前进约230 m。综上所述，近150 a来巴托拉冰舌每隔50~60 a就会发生一轮前进，但每轮前进一般只可维持10~20 a，总体而言，近150 a来巴托拉冰川以退缩为主导[23]。

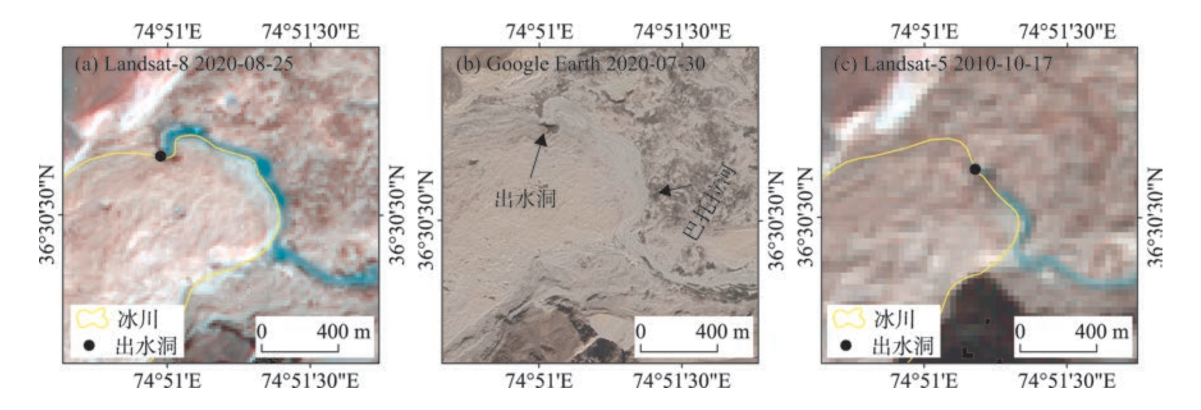


图2　巴托拉冰川出水洞与融水径流的识别

Fig. 2　Identification of drainage system of the Batura Glacier

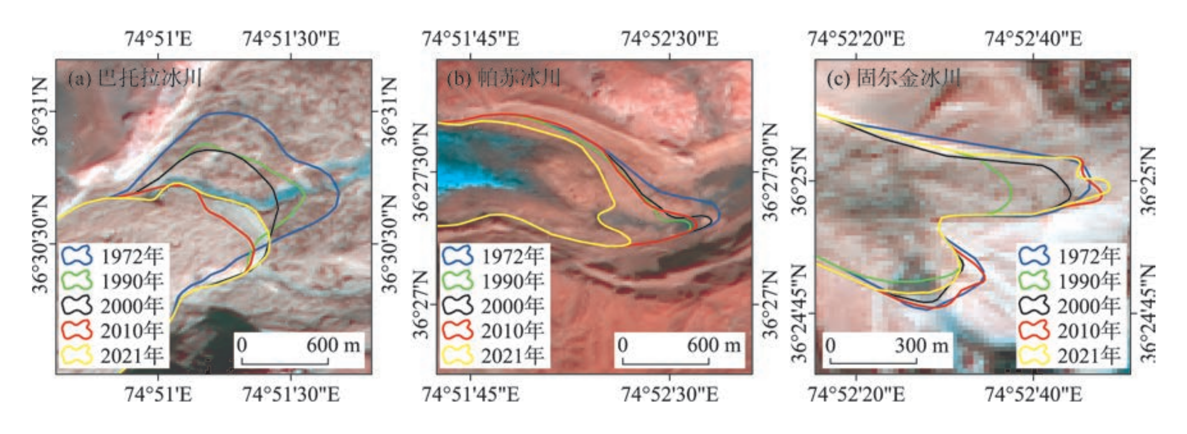


图3　1972—2021年巴托拉、帕苏、固尔金冰川进退变化

Fig. 3　Terminus positions at different periods for the Batura, Pasu, and Ghulkin Glacier from 1972 to 2021

帕苏冰川虽曾于1907—1913年发生过大规模跃动,导致冰舌前进约1200 m[24],但此后却长期处于退缩状态,仅在2000年前后发生过一次前进。1972—1998年,帕苏冰舌累计后退约180 m,1998—2002年前进220 m,2002—2021年再次后退约570 m。因此近百年来,帕苏冰川总体处于加速退缩状态(图3b)。

近百年来,固尔金冰川进退频繁,堪称公路沿线最活跃的冰川之一。1885—1980年固尔金冰川发生了3轮进退,期间还伴随着多次小幅度波动[6]。1966—1978年,固尔金南冰舌后退260 m,1978—1980年却又前进260 m,此后前进速率减缓,1980—1994年累计前进100 m[6]。之后再度衰退,至2021年累计退缩约390 m。北冰舌更加活跃(图3c),1972—1990年后退200 m,1990—1998年又前进170 m。之后,冰舌开始在小范围内频繁波动,最终在1998—2018年累计前进120 m。2018年起冰舌再次衰退,至2021年已后退约36 m。

3.2　融水通道变化

1973年6—7月,巴托拉河改道后冰川主出水洞由中流线附近转移至冰舌南侧,但此后主出水洞位置开始缓慢迁移。2000年之前迁移速率较慢,基本稳定在冰舌南侧。2000年之后,迁移速率明显加快,逐步越过中流线到达冰舌北侧。至2021年6月,主出水洞已处于冰舌西北侧,排水道随之延伸完全横亘于冰舌前(图4a)。2021年6—7月,冰舌的突然前进挤压切断了主排水道,引发了近50 a来巴托拉河的又一次大改道(图4b)。由于冰坝阻挡,融水径流被迫在冰碛丘陵中侵蚀切割出一条新的通道,直接导致巴托拉河由2.9 km缩短为2.5 km,纵比降由65‰增大至76‰,因此流速显著增快。

受地形影响,帕苏冰川的排水通道十分稳定。但在1981年之后,冰舌附近在融水补给下形成了一个小型终碛阻塞湖,2011年实测面积约0.12 km^2[10]。在水量增加、冰舌崩塌、谷坡落石等的共同作用下,阻塞湖曾于2007年7月、2008年1月、4月等数次发

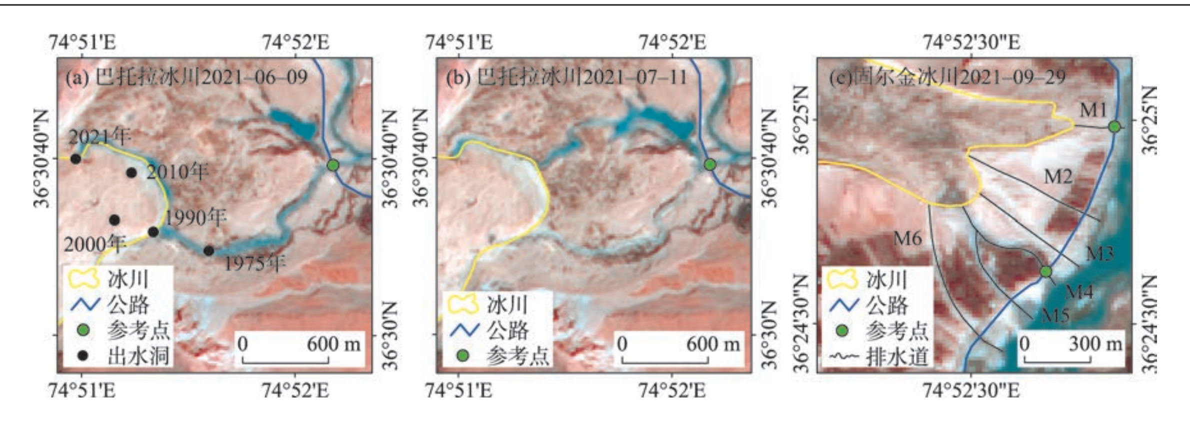


图4 巴托拉、固尔金冰川融水径流排水通道变化

Fig. 4 Variations of the meltwater runoff drainage channel of the Batura and Ghulkin Glacier

生溃决，引发冰湖溃决洪水[3,10]。但经过数次溃决以及融水径流的长期侵蚀，近年来帕苏冰湖终碛堤的完整性已遭到破坏，冰湖发育规模受到很大限制。

固尔金段是公路沿线受冰川融水影响最大的路段之一。由于冰舌分为南北两支且融水径流流程极短，不足1 km，因此冰川融水呈辐散状，极不稳定且频繁发生改道。固尔金冰川主要排水通道约有6条，小型通道则难以计数[6,10]。其中，北冰舌融水集中在M1通道，南冰舌的M2通道也已基本废弃（图4c）。长期以来，M5为南冰舌的主排水道，但近年来M4的水量也在增大。M3曾在2014年前后短暂成为主排水道，但之后水量又迅速减少，M6水量也较为有限。因此，近年来南冰舌融水通道以M5与M4为主，M3与M6为辅。

3.3 冰面高程与流速

近年来“喀喇昆仑异常”现象备受关注，但就处于喀喇昆仑山西北边缘的巴托拉地区而言，2000年以来的冰川物质亏损却有所加速[20,25]。基于KH-9 DEM和SRTM DEM的研究发现，1973—1999年巴托拉和帕苏冰川物质平衡分别为0.00±0.10 m w.e. a^{-1}和0.05±0.11 m w.e. a^{-1}，表明2000年以前冰川物质收支基本保持稳定[20]。但此后的2000—2016年，巴托拉、帕苏、固尔金冰川表面高程均发生了下降（图5a），下降速率分别为0.09±0.29 m·a^{-1}、0.15±0.17 m·a^{-1}和0.08±0.26 m·a^{-1}，尤以冰川末端表现最为明显[14]。尽管下降速率较为微弱，但这依旧表明2000年以来巴托拉地区冰川发生了物质亏损。

长期以来，3条研究冰川均维持着较高的表面流速。1985—2018年，巴托拉、帕苏、固尔金冰川的平均流速分别为59.60±0.28 m·a^{-1}、106.44±0.44 m·a^{-1}和19.50±0.35 m·a^{-1}。就流速的空间分布而言（图5b），高值区域均出现在冰川上游的粒雪线附近。巴托拉冰川的最大流速出现在粒雪盆出口，第一、第二冰流构成的冰瀑布处，接近1200 m·a^{-1}。帕苏

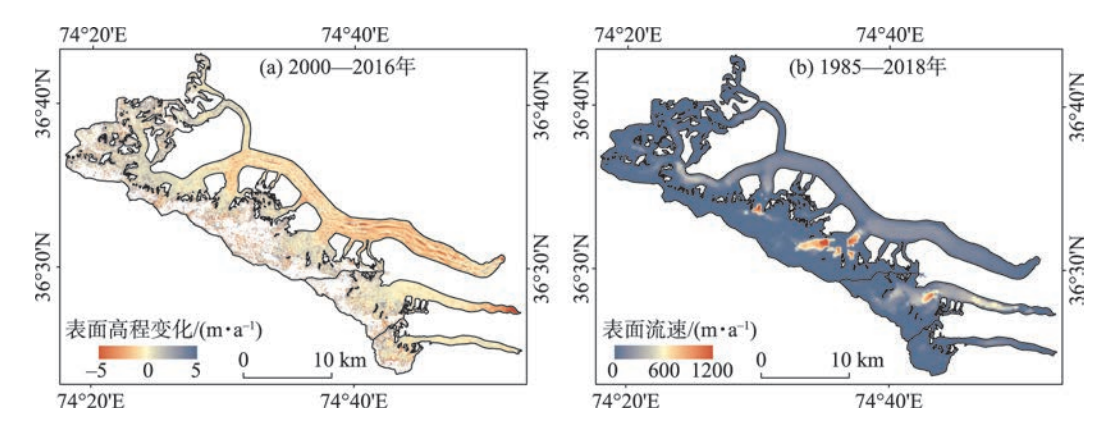


图5 巴托拉、帕苏、固尔金冰川表面高程变化(a)与年平均流速(b)

Fig. 5 Surface elevation change (a) and annual average flow velocity (b) of the Batura, Pasu, and Ghulkin Glacier

冰川的最大流速出现在相同的位置,约940 m·a⁻¹。固尔金冰川流速相对平缓,最大流速也出现在了冰瀑布以下的附近位置。相较于巴托拉和固尔金冰川,帕苏冰川流速较快,意味着其物质平衡水平更高,这是帕苏冰舌消融更强烈的主要原因。

4 讨 论

4.1 冰川变化的影响因素

山地冰川是气候与地形共同作用的产物,但在十年或百年尺度上,冰川变化主要受气候条件的影响[26]。冰川物质平衡直接由当年气候状态决定,末端进退却更多地受气候长周期波动的影响,因为从气候变化到冰舌波动需要一个能量积聚和动力反映的过程,即存在滞后性。滞后期的长短主要与冰川规模有关,小规模冰川为3~30 a,大规模冰川则会更长[4,27]。

就巴托拉、帕苏、固尔金这种大型复式山地冰川而言,气温的长周期波动是影响冰舌进退的关键因素[8]。如图5所示,2000年以来,冰川积累区基本保持稳定,消融区高程则有所降低,表明近几十年来罕萨河谷的升温直接导致了冰川物质亏损的加剧[28-29]。而巴托拉、帕苏、固尔金冰舌在减薄的同时发生进退波动,则充分体现了冰舌进退对气候响应的滞后性以及冰川规模对于滞后性的影响。有研究表明,近150 a来巴托拉冰舌进退相较于气温波动存在60 a左右的滞后期,冰川的数次前进均与气温的阶段性变化存在很好的对应关系[4,7-8]。基于这一判断,不仅成功预测了巴托拉冰舌在1970s—2000年的进退,还成功预测了冰舌在2010s的最新一轮的前进。

跃动冰川指周期性发生快速运动的冰川,当跃动发生时其速度往往是平时的数倍至上百倍[9]。有研究将巴托拉第一、第二冰流等部位的高流速、大量裂隙与弧拱发育视为跃动的表现[24],但实际上这对于大型山地冰川而言并不罕见。对巴托拉这种巨型冰川而言,支冰流跃动对末端进退的影响也十分有限,如克拉牙依拉克、费德琴科等冰川支冰流的跃动并未改变整体的退缩趋势[30-31]。帕苏冰川曾于1907—1913年,固尔金冰川曾于1913—1925年、1966—1978年发生跃动[24],但近50 a来2条冰川的积累区并未发生显著增厚,因此在近期发生大规模跃动的可能性较低。

4.2 融水径流的影响因素

较高的物质平衡水平导致3条冰川的融水径流量明显高于其他地区的同等规模冰川,巴托拉冰川甚至高于近710 km²的费德琴科冰川[4]。巴托拉河多年平均流量为40.1 m³·s⁻¹,瞬时最大流量可超过600 m³·s⁻¹,其中近80%的径流量集中在5—9月,近60%集中在7—8月[4,32]。巴托拉河90%的水量来源于冰川融水,因此径流量主要受气温控制,随气温上升而增加,在夏季降水条件下有时甚至会因气温下降而减少[4]。此外,即便在7—8月巴托拉河的径流量波动也十分剧烈,常随极端高温天气的出现而陡涨[32]。帕苏、固尔金冰川融水径流的年内变化与巴托拉河类似,但变化过程远不及前者剧烈。

巴托拉河径流年际变化较为平缓,主要由于:(1)干旱年份降水偏少而融水偏多,湿润年份降水偏多而融水偏少,起到了天然的调节作用[31]。(2)冰舌区年平均气温接近10 ℃,导致消融十分剧烈,存在热融喀斯特现象,因此冰内裂隙、孔穴,冰碛物的滞水能力也能起到一定的径流调节作用[4,32]。(3)1970s以来巴托拉流域冰川基本保持稳定,即便2000年以来物质亏损有所增加,但对融水径流的影响依旧有限。实际上不仅是巴托拉河,1980s以来整个罕萨河流域的年径流量也无明显变化[33]。

巴托拉河在1973年和2021年的2次改道有一定的相似性,改道均发生在6—7月融水径流快速上升的时期、改道前主排水洞均已发生长期缓慢的迁移、改道的发生均与冰舌突然前进有关,因此2次改道的原因也是基本相同的。如图1所示,巴托拉冰川的物质来源极不对称,冰舌北侧主要由尤克苏戈兹、北、西冰流等构成、南侧主要由第一、第二冰流构成。由于南侧冰流拥有更大的高差与更开阔的粒雪盆,因此物质供给量更大,直接导致冰舌南侧厚度与流速均高于北侧[4,34]。冰川中下游,南侧弧拱与裸冰的延伸范围明显大于北侧就是二者存在流速差的直观表现。在这种流速差的长期作用下,主排水洞受到推挤而缓慢北移,排水道随之延长并横亘于冰舌前,最终被突然前进的冰舌切断而被迫改道。因此,冰舌南北两侧物质供给量的差异是巴托拉河改道的根本原因,冰舌的突然前进则是直接原因[4]。

4.3 对公路的影响

本研究在公路沿线选取了4个稳定的参考点,

分别为巴托拉桥、帕苏桥、M1桥、M4桥，以参考点与冰舌的最近距离来衡量公路与冰川的距离。如图6所示，近50 a来巴托拉冰舌与公路的距离总体上在增大，当前尚有1 km以上，因此在短期内不会对公路产生直接威胁。帕苏冰舌自2000年以来不断加速后退，与公路的距离也在增大，因此短期内也不会直接威胁公路。尽管固尔金南北冰舌仅在小范围内波动，但由于距离过近，且在将来不能排除发生跃动的可能，因此对公路的直接威胁将长期存在。

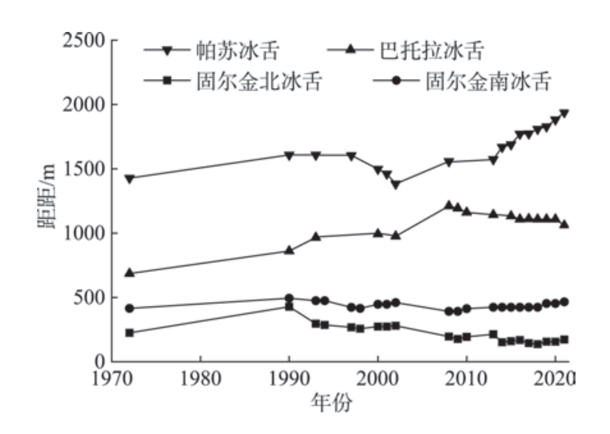


图6 1972—2021年巴托拉、帕苏、固尔金冰舌与公路的距离变化

Fig. 6 Variations of the distances from glacier tongues of the Batura, Pasu, and Ghulkin Glacier to the Karakoram highway from 1972 to 2021

巴托拉冰川对公路更现实的威胁在于巴托拉河新的大改道。2021年6—7月改道后，巴托拉河流程缩短，比降增大，下切侵蚀能力增强，近1 a年来，新河道明显拓宽加深(图7)。更关键的是新河道下游折向南流，与公路基本平行，因此水流将在转弯处直接冲击路基。甚至完全可以推测，正是由于路基坚固才迫使水流南流返回故道。巴托拉河具有流量大、径流高度集中、陡涨陡落等特点[32]，因此在未来的强烈消融季中，随着水量陡涨，超过600 $m^3 \cdot s^{-1}$的水流裹挟冰块砂石奔腾下泄，将对路基产生强烈侵蚀，对公路构成重大威胁。

帕苏冰川近年来消融强烈导致融水径流增大，但由于冰湖发育规模受限，大规模冰湖溃决洪水对于下游公路的威胁趋于减弱。固尔金冰川融水轻则在路面积水结冰，影响通行，重则侵蚀路基、淤积桥底，甚至引发泥石流洪水。但在2008年采取工程措施后，固尔金段的融水灾害已得到了有效治理[3]。然而，固尔金冰川融水径流的迁移摆动问题仍不容

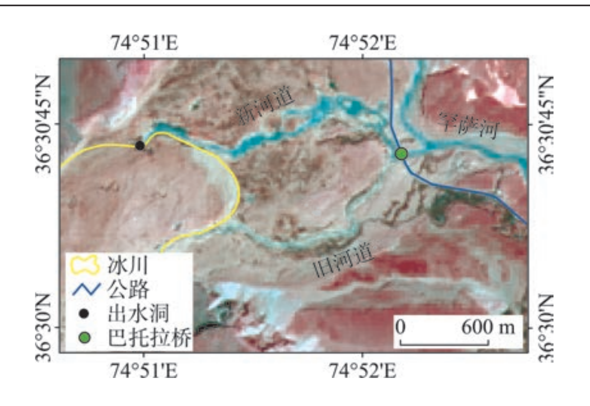


图7 2022年5月27日巴托拉冰舌区概况

Fig. 7 Overview of Batura Glacier tongue on May 27, 2022

忽视，一方面它可能会导致过水工程废弃，但更重要的是径流量可能会超过单一通道的排水能力，进而引发新的灾害。

5 结 论

中巴喀喇昆仑公路巴托拉段受冰川灾害威胁最为严重，是影响公路畅通运行的关键路段。基于野外考察与遥感影像等资料，分析了巴托拉、帕苏、固尔金冰川近百年来的变化、变化原因及对中巴公路的影响，主要结论如下：

(1) 近百年来，特别是2000年以来，巴托拉、帕苏、固尔金冰川总体处于微弱退缩状态，冰舌发生后退减薄或基本保持稳定，对公路的直接威胁趋于减弱。

(2) 在冰川消融加剧与冰舌波动的共同影响下，巴托拉段冰川融水径流频繁迁移改道，冰川融水洪水、冰湖溃决洪水、冰川泥石流等次生灾害对公路的威胁正日渐凸显。

(3) 巴托拉段冰川变化对公路最直接的威胁在于2021年6—7月巴托拉河新的改道，改道后水流将直接冲击侵蚀路基，影像公路安全通行。

参考文献(References)：

[1] 姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209. [Yao Tandong, Wu Guangjian, Xu Baiqing, et al. Asia Water Tower change and its impacts[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1203-1209.]

[2] 朱颖彦, 杨志全, 廖丽萍, 等. 中巴喀喇昆仑公路冰川地貌地质灾害[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 81-90. [Zhu Yingyan, Yang Zhiquan, Liao Liping, et al. Glacialized geomorphologcial geohazard

along China-Pakistan International Karakoram Highway[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 81−90.]

[3] 朱颖彦, 杨志全, Steve Z, 等. 中巴喀喇昆仑公路冰川灾害[J]. 公路交通科技, 2014, 31(11): 51−59. [Zhu Yingyan, Yang Zhiquan, Steve Z, et al. Glacier geo-hazards along China-Pakistan International Karakoram Highway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(11): 51−59.]

[4] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 喀喇昆仑山巴托拉冰川考察与研究[M]. 北京: 科学出版社, 1980. [Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Professional Papers on the Batura Glacier, Karakoram Mountains[M]. Beijing: Science Press, 1980.]

[5] 施雅风, 张祥松. 喀喇昆仑山巴托拉冰川的近代进退历史变化[J]. 地理学报, 1978, 33(1): 27−40. [Shi Yafeng, Zhang Xiangsong. Historical variations in the advance and retreat of the Batura Glacier in the Karakoram Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 1978, 33(1): 27−40.]

[6] 廖丽萍, 朱颖彦, 杨志全, 等. 中国—巴基斯坦喀喇昆仑公路Ghulkin冰川百年进退变化[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1391−1399. [Liao Liping, Zhu Yingyan, Yang Zhiquan, et al. Advance and retreat fluctuation of the Ghulkin Glacier along the Karakoram Highway over hundred years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1391−1399.]

[7] 张祥松, 陈建明, 蔡祥兴, 等. 国际喀喇昆仑公路沿线巴托拉冰川变化预测的验证[J]. 冰川冻土, 1996, 18(2): 97−103. [Zhang Xiangsong, Chen Jianming, Cai Xiangxing, et al. Verification on the prediction of the Batura Glacier along the International Karakoram Highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(2): 97−103.]

[8] 张祥松. 喀喇昆仑公路沿线冰川的近期进退变化[J]. 地理学报, 1980, 35(2): 149−160. [Zhang Xiangsong. Recent variations in the glacial termini along the Karakoram Highway[J]. Acta Geographica Sinica, 1980, 35(2): 149−160.]

[9] Farinotti D, Immerzeel W W, Kok R J, et al. Manifestations and mechanisms of the Karakoram Glacier Anomaly[J]. Nature Geoscience, 2020, 13(1): 8−16.

[10] 朱颖彦, 李超月, 杨志全, 等. 中巴喀喇昆仑公路冰湖溃决灾害[J]. 山地学报, 2021, 39(4): 524−538. [Zhu Yingyan, Li Chaoyue, Yang Zhiquan, et al. Glacier Lake Outburst Flood (GLOF) along China- Pakistan International Karakoram Highway[J]. Mountain Research, 2021, 39(4): 524−538.]

[11] 朱颖彦, 潘军宇, 李朝月, 等. 中巴喀喇昆仑公路冰川泥石流[J]. 山地学报, 2022, 40(1): 71−83. [Zhu Yingyan, Pan Junyu, Li Chaoyue, et al. Glacier debris flow along China-Pakistan International Karakoram Highway (KKH)[J]. Mountain Research, 2022, 40(1): 71−83.]

[12] Shangguan D H, Bolch T, Ding Y J, et al. Mass changes of Southern and Inylchek Glacier, Central Tian Shan, Kyrgyzstan, during 1975 and 2007 derived from remote sensing data[J]. The Cryosphere, 2015, 9(2): 703−717.

[13] Nuimura T, Sakai A, Taniguchi K, et al. The GAMDAM glacier inventory: A quality controlled inventory of Asian glaciers[J]. The Cryosphere, 2015, 8(3): 849−864.

[14] Brun F, Berthier E, Wagnon P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016 [J]. Nature Geoscience, 2017, 10(9): 668−674.

[15] Gardner A S, Scambos T, Moholdt G, et al. ITS_LIVE regional glacier and ice sheet surface velocities[DB/OL]. National Snow and Ice Data Center, 2019, doi: 10.5067/6II6VW8LLWJ7.

[16] 黄丹妮, 张震, 张莎莎, 等. 东帕米尔高原冰川运动特征分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 131−140. [Huang Danni, Zhang Zhen, Zhang Shasha, et al. Characteristics of glacier movement in the eastern Pamir Plateau[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 131−140.]

[17] Dehecq A, Gourmelen N, Gardner A S, et al. Twenty-first century glacier slowdown driven by mass loss in High Mountain Asia[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(1): 22−27.

[18] Sakai A. Brief communication: Updated GAMDAM glacier inventory over high-mountain Asia[J]. The Cryosphere, 2019, 13(7): 2043−2049.

[19] Molg N, Bolch T, Rastner P, et al. A consistent glacier inventory for Karakoram and Pamir derived from Landsat data: Distribution of debris cover and mapping challenges[J]. Earth System Science Data, 2018, 10(4): 1807−1827.

[20] Bolch T, Pieczonka T, Mukherjee K, et al. Brief communication: Glaciers in the Hunza catchment (Karakoram) have been nearly in balance since the 1970s[J]. The Cryosphere, 2017, 11: 531−539.

[21] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3−16. [Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the second Chinese glacier inventory[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 3−16.]

[22] Mason K. The glaciers of the Karakoram and neighborhood[J]. Records of the Geological Survey of India, 1930, 63: 214−278.

[23] 张祥松, 陈建明, 王文颖, 等. 喀喇昆仑山巴托拉冰川的新近变化[J]. 冰川冻土, 1996, 18(S1): 33−45. [Zhang Xiangsong, Chen Jianming, Wang Wenying, et al. Recent variations of the Batura Glacier in the Karakoram Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(S1): 33−45.]

[24] Bhambri R, Hewitt K, Kawishwar P, et al. Surge-type and surge-modified glaciers in the Karakoram[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 15391.

[25] Hewitt K. The Karakoram Anomaly? Glacier expansion and the 'Elevation Effect', Karakoram Himalaya[J]. Mountain Research and Development, 2005, 25(4): 332−340.

[26] Li Y J, Ding Y J, Shangguan D H, et al. Climate-driven acceleration of glacier mass loss on global and regional scales during 1961−2016[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 51(3): 453−

464.

[27] 王宁练, 张祥松. 近百年来山地冰川波动与气候变化[J]. 冰川冻土, 1992, 14(3): 241-250. [Wang Ninglian, Zhang Xiangsong. Mountain glacier fluctuations and climatic change during the last 100 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1992, 14(3): 241-250.]

[28] 巫建逢, 张寅生, 高海峰, 等. 印度河上游流域冰川度日因子变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 264-274. [Wu Jianfeng, Zhang Yinsheng, Gao Haifeng, et al. Variation of degree-day factors and its affecting factors in the upper Indus Basin[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 264-274.]

[29] 于志翔, 于晓晶, 杨帆. 近40 a中巴经济走廊气候变化时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 695-703. [Yu Zhixiang, Yu Xiaojing, Yang Fan. Spatio-temporal characteristics of climate change in China-Pakistan Economic Corridor from 1980 to 2019 [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 695-703.]

[30] Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. Characterizing the May 2015 Karayaylak Glacier surge in the eastern Pamir Plateau using remote sensing[J]. Journal of Glaciology, 2016, 62(235): 944-953.

[31] Wendt Y, Mayer C, Lambrecht A, et al. A glacier surge of Bivachny Glacier, Pamir Mountains, observed by a time series of high-resolution Digital Elevation Models and glacier velocities[J]. Remote Sensing, 2017, 9(4): 388.

[32] 李念杰, 蔡祥兴, 李槭. 喀喇昆仑山巴托拉冰川水文某些特征的探讨[J]. 冰川冻土, 1981, 3(2): 41-44. [Li Nianjie, Cai Xiangxing, Li Jian. Discussion on some hydrological features of the Batura Glacier, Karakoram[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3(2): 41-44.]

[33] Farhan S B, Zhang Y S, Aziz A, et al. Assessing the impacts of climate change on the high altitude snow-and glacier-fed hydrological regimes of Astore and Hunza, the sub-catchments of Upper Indus Basin[J]. Journal of Water and Climate Change, 2020, 11(2): 479-490.

[34] 黄兆欢, 彭思佳, 褚洪义, 等. 基于时序偏移量跟踪技术的喀喇昆仑山Batura和Passu冰川表面流速监测[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(5): 569-576. [Huang Zhaohuan, Peng Sijia, Chu Hongyi, et al. Surface velocity monitoring of the Batura and Passu glaciers in the Karakoram Mountains based on time series offset tracking technology[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences Edition), 2021, 57(5): 569-576.]

Recent variations of the Batura, Pasu, and Ghulkin glaciers and their potential impact on the Karakoram highway

LI Zhijie[1,2], WANG Ninglian[1,2,3], CHANG Jiawen[1,2]

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. Institute of Earth Surface System and Hazards, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 3. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The Karakoram highway (KKH) is a strategic channel connecting China and Pakistan and promoting the opening up of Xinjiang to the outside world. It is situated on the valley floors of the Pamir-Hindu Kush-Karakoram, where the densest mountain glaciers exist in High Mountain Asia (HMA). The KKH has been affected by glacier hazards for a long time, especially the Batura-Ghulkin section in the middle reaches of the Hunza River. In this study, based on the research documents, field investigation reports, Landsat MSS\TM\ETM+ \OLI images, elevation change data sets of HMA, and ITS_LIVE glacier surface velocity data, we reconstructed the historical changes of the Batura, Pasu, and Ghulkin glaciers, including the glacier area, surface elevation, surface velocity, and meltwater runoff over the last 100 years, as well as the impact of glacier variations on KKH. The results show that over the past 100 years, the Batura and Pasu glaciers have generally retreated, with the distance increased between the glacier tongue and KKH, while the Ghulkin glacier has remained stable. Therefore, for the KKH, the current changes in the Batura and Pasu glaciers pose no direct threat. As the Ghulkin glacier is too close to the KKH, particularly the northern glacier tongue, which is only about 170 m, the direct threat to the highway will persist for a long time. For the Batura glacier, the more realistic threat is the migration and reorganization of the meltwater runoff drainage channel (Batura River) from June to July 2021. After the diversion, the water flow will cause strong erosion of the roadbed, which must be attended to by the government. The Pasu glacier has been retreating strongly in the past decades, and the risk of large-scale glacial lake outburst flood has also decreased recently, so the glacier hazard's threat to the KKH is weakening. With the construction of drainage facilities, the meltwater runoff of the Ghulkin Glacier has been effectively channeled, but the disaster risk contained in the migration and swing of the meltwater channel can not be ignored.

Keywords: Karakoram highway; Batura glaciers; meltwater runoff; glacier hazards